

DOI: 10.20103/j.stxb.202309111951

魏书蒙, 陈详腾, 赵光宇, 李仰龙, 董玉红, 焦如珍, 张雄清. 杉木人工林近自然改造对土壤化学性质及酶活性的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4277-4287.

Wei S M, Chen X T, Zhao G Y, Li Y L, Dong Y H, Jiao R Z, Zhang X Q. Effects of close-to-nature transformation of Chinese fir plantation on soil chemical properties and enzyme activities. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4277-4287.

杉木人工林近自然改造对土壤化学性质及酶活性的影响

魏书蒙^{1,2,3}, 陈详腾^{1,2,3}, 赵光宇^{1,2,3}, 李仰龙^{1,2,3}, 董玉红^{1,2,3,*}, 焦如珍^{1,2,3}, 张雄清^{1,2,3}

1 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100091

2 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091

3 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

摘要: 研究杉木间伐后补栽闽楠、刨花楠进行近自然改造后对杉木人工林土壤化学性质及水解酶活性变化。在江西省新余市山下林场为研究近自然改造对杉木林的影响而设置 3 种林分, 分别是杉木纯林 (CLP)、杉木-闽楠改造林 (MPC)、杉木-刨花楠改造林 (MMC)。测定 0—20、20—40、40—60 cm 土壤化学性质和水解酶活性, 分析土壤化学性质与水解酶间的关系。不同林分土壤有机质、有效磷和速效钾均随土层深度增加而降低。0—20 cm 土层, 改造林 pH、有机质和有效磷显著增加, 其中有机质分别提高 22.52% 与 21.04%, 有效磷分别提高 5.9% 与 9.57%。20—40 cm 土层, 改造林有机质显著增加, 有效磷、速效钾含量无显著差异。不同林分对养分全量的影响不一。40—60 cm 土层, 改造林与杉木纯林在有机质、全氮、全钾、速效钾含量有显著差异。不同林分土壤 N:P 均低于我国亚热带区域土壤 N:P, 土壤有效磷元素缺乏; 改造林土壤 C:N、C:P 均高于杉木纯林。杉木-闽楠改造林土壤纤维二糖水解酶 (CBH)、亮氨酸氨基肽酶 (LAP) 和酸性磷酸酶 (ACP) 酶活性相比杉木纯林显著降低; 土壤 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶 (NAG)、酸性磷酸酶 (ACP), 杉木-刨花楠改造林较杉木纯林显著增加。相关性分析表明, 不同林分土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、土壤酶活性之间存在显著关系。[结论] 杉木纯林间伐后近自然改造有助于土壤养分积累, 改善杉木人工林土壤质量, 提高杉木胸径、材积, 减缓单一树种种植带来的土壤肥力下降等问题。

关键词: 杉木; 近自然改造; 土壤化学性质; 生态化学计量比; 土壤酶活性

Effects of close-to-nature transformation of Chinese fir plantation on soil chemical properties and enzyme activities

WEI Shumeng^{1,2,3}, CHEN Xiangteng^{1,2,3}, ZHAO Guangyu^{1,2,3}, LI Yanglong^{1,2,3}, DONG Yuhong^{1,2,3,*}, JIAO Ruzhen^{1,2,3}, ZHANG Xiongqing^{1,2,3}

1 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: This paper aims to study the changes of soil chemical properties and hydrolase activity of Chinese fir plantation after close-to-natural transformation of *Phoebe bournei* and *Machilus pauhoi* after thinning of Chinese fir. Three kinds of stands were set up in Shanshan Forest Farm in Xinyu City, Jiangxi Province, which were *Cunninghamia lanceolata* pure forest (CLP), mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei* (MPC), and mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Machilus pauhoi* (MMC). The chemical properties and hydrolase activities of 0—20, 20—40, and 40—

基金项目: 国家重点研发项目 (2021YFD2201304)

收稿日期: 2023-09-11; 网络出版日期: 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhongdong@163.com

60 cm soils were determined, and the relationship between soil chemical properties and hydrolase was analyzed. The results showed that soil organic matter, available phosphorus and available potassium in different stands decreased with the increase of soil depth. In the 0—20 cm soil layer, the pH, organic matter and available phosphorus of the reformed forest increased significantly, among which the organic matter increased by 22.52% and 21.04%, respectively, and the available phosphorus increased by 5.9% and 9.57%, respectively. In the 20—40 cm soil layer, the organic matter of the close-to-nature transformation forests increased significantly, and there was no significant difference in the available phosphorus and available potassium. The different stands had different effects on total nutrient. In the 40—60 cm soil layer, the contents of organic matter, total nitrogen, total potassium and available potassium were significantly different between the close-to-nature transformed forest and the pure forest of *Cunninghamia lanceolata*. Soil N:P in different stands was lower than that in the subtropics of China, and the available P element was lacking. Soil C:N and C:P in modified forest were higher than those in pure Chinese fir forest. The enzyme activities of cellobiose hydrolase (CBH), leucine aminopeptidase (LAP) and acid phosphatase (ACP) in soil of mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Machilus pauhoi* were significantly decreased compared with those of pure forest of *Cunninghamia lanceolata*. β -1, 4-n-acetylglucosaminoglycosidase (NAG), ACP, and the close-to-natural transformation forest of *Cunninghamia lanceolata* and wood shaplanus were significantly increased compared with pure forest of *Cunninghamia lanceolata*. The correlation analysis showed that soil pH, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and soil enzyme activity were significantly correlated in different stands. [Conclusion] The close-to-nature transformation forest of the *Cunninghamia lanceolata* after cutting in pure interstand is helpful to the accumulation of soil nutrients, improves the soil quality of Chinese fir plantation, increases the diameter at breast height (DBH) and volume of *Cunninghamia lanceolata*, and alleviate the problems of soil fertility decline caused by single tree planting.

Key Words: Chinese fir; close-to-natural transformation; soil chemical properties; ecological stoichiometric ratio; soil enzyme activity

土壤酶是土壤有机质和矿物组分生物代谢的直接介质,催化着碳、氮、磷的转化^[1],主要包括:降解木质纤维素的 β -1,4-葡萄糖苷酶(β G, β -1,4-glucosidase)和纤维二糖水解酶(CBH,cellobiase),降解几丁质和肽聚糖的 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖酶(NAG, β -1,4-N-acetylglucosaminidase),水解蛋白质和多肽的亮氨酸氨基肽酶(LAP,leucine aminopeptidase)和参与有机磷分解的酸性磷酸酶(ACP,acid or alkaline phosphatase)^[2]。土壤酶活性与土壤理化性质密切相关,土壤酶能够活化土壤中各类元素的化合物,提升土壤养分有效性。土壤养分总量和土壤养分有效性都直接影响植物的生长发育,反映土壤的肥力状况^[3]。此外,土壤酶与土壤养分及质量的提升密切相关^[4]。已有研究表明土壤酶受到温度、水分、pH、养分含量、微生物生物量以及植被特征等因素的影响^[5-6]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的速生用材树种,广泛栽培于我国南方地区,种植面积占全国人工林总面积的20%^[7]。杉木长期单一纯林经营,导致土壤肥力不断下降(氮素缺乏、磷素固定),这成为限制我国杉木人工林生长的主要因素,极大制约杉木人工林的长期发展^[8]。解决杉木人工林培育过程中的土壤质量下降问题和保持土壤肥力成为亟需解决的关键问题。相关研究表明,森林生态系统树种多样性能显著增加森林初级生产力,提高土壤微生物群落的稳定性,提高养分循环效率^[9-10],以及有效改善土壤养分,促进林木生长,提高林分结构稳定等^[11-12]。

近自然改造是尊重自然规律的基础上,通过科学的人为干预,使森林能模拟以近自然状态自发生长的森林经营模式,最终实现森林的自然与可持续更替。通过近自然改造将杉木纯林改为有多生态功能的针阔异龄混交林的方法应运而生^[13]。例如,潘云龙等^[14]研究指出,杉桐混交造林模式能显著改善土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性,有利于土壤有机质、有效氮的积累,微生物生物量得到显著提高。黄钰辉等^[15]研究表明,南

亚热带杉木纯林改造成杉阔混交林,土壤 pH、速效氮和有效磷质量分数方面有效提高,土壤改良效果明显。但是,目前针对现有杉木纯林的近自然化改造研究仍然较少。尤其是在同一立地条件下,从土壤化学性质与参与土壤碳、氮、磷循环的土壤水解酶、以及结合杉木胸径、材积的角度去反映杉木纯林在向不同树种混交林转化过程中的养分变化的研究更是鲜有报道。因此,本研究以江西山下林场杉木纯林、杉木-闽楠改造林及杉木-刨花楠改造林为研究对象,探究杉木纯林、杉木与阔叶林混交模式下土壤化学性质和土壤酶活性的差异以及对土壤肥力和土壤养分循环的影响,为杉木人工林的可持续发展与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

研究试验林位于江西省新余市分宜县山下林场(114°66'E, 26°74'N),隶属于中国林业科学研究院亚热带林业实验中心,海拔 145.37 m,亚热带季风气候,年均气温 17.1℃;年均降水量 1590 mm;无霜期长,年均无霜期 270 d;地形以低山丘陵为主。土壤主要为红壤及其亚型,酸性;母岩以千枚岩为主。林下植被主要有黑足鳞毛蕨(*Dryopteris fuscipes*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)和杜茎山(*Maesa japonica*)等。本研究选择的杉木人工林是 1991 年在前茬杉木砍伐炼山后种植,林分密度为 1200 株/hm²。2011 年,选择立地条件和生长情况基本相似的 20 年林龄杉木纯林,进行近自然改造,将杉木林随机分为 3 个区域,其中一个保持原密度不间伐,另外 2 个区域行状间伐后,1:1 补种一年生、株高 25—35 cm 的闽楠和刨花楠,并保持样地内的杉木数量和阔叶树数量基本一致。每种林分面积为 2hm² 左右,三种林分分别为杉木人工纯林(*Cunninghamia lanceolata* plantation, CLP)、杉木-闽楠改造林(Mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei*, MPC)、杉木-刨花楠改造林(Mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Machilus pauhoi*, MMC),改造后前三年进行除草抚育并加强对改造林的管护,避免病虫害发生。此后,三个林分均没有人为干扰和自然灾害发生。三种林分的杉木平均胸径、株高见表 1。

表 1 杉木的胸径和树高

Table 1 Chest diameter and tree height of Chinese fir

指标 Indicators	杉木纯林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation(CLP)	杉木-闽楠改造林 Mixed plantation of <i>Cunninghamia lanceolata</i> and <i>Phoebe bournei</i> (MPC)	杉木-刨花楠改造林 Mixed plantation of <i>Cunninghamia lanceolata</i> and <i>Machilus pauhoi</i> (MMC)
胸径 Diameter at breast height/cm	18.3	28.95	22.15
株高 Tree height/m	16.37	17.39	17.79

1.2 试验研究方法

1.2.1 土壤样品采集

于 2022 年 7 月野外采样。沿 S 型选择 15 个采样点(改造林点位取在不同树种的连线中心区)。选择杉木纯林、杉木-闽楠改造林和杉木-刨花楠改造林(每个林分域布设三块 20 m×20 m 样地),分别采集 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤,将同一样地同一土层的样品混合,按照四分法取 2 kg 带回实验室。一部分风干过 2 mm 和 0.149 mm 筛,用于测定土壤化学性质,另一部分干冰保存带回实验室,于 4℃ 冰箱保存,用于土壤酶活性的测定^[13, 16]。

1.2.2 胸径株高测定

测量每个样地所有杉木的胸径(DBH)和树高(H)。胸径采用围径尺测量,树高采用测高标杆测量,并根据平均胸径和株高计算单株材积。

材积计算参考李朝栋等^[17]制定的江西省杉木人工林二元立木材积公式:

$$TV = 0.000070511834 \times DBH^3 + 1.798838059031 \times H - 0.991179776772 \quad (1)$$

式中,TV 为单株材积(m³);DBH 为胸径(cm);H 为株高(m)。

1.2.3 土壤化学性质测定

采用电位法测定土壤 pH 值(LY/T1239-1999,酸性土壤应用 1 mol/L 氯化钾溶液,水土比为 2.5:1);土壤有机质(soil organic matter,SOM)采用重铬酸钾氧化外加热法测定(LY/T1237-1999);凯氏定氮法测定土壤全氮(Total nitrogen,TN)(LY/T1228—2015);全磷(Total phosphorus, TP)采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定(LY/T1232—2015);全钾(Total potassium, TK)采用酸溶火焰光度法测定(LY/T1234—2015)。有效磷(Available phosphorus, AP)用 25 mL NH_4F (0.03 mol/L) 和 HCl (0.025 mol/L) 混合液浸提(LY/T1232—2015);速效钾(Available potassium, AK)用 5mL NH_4Ac (1 mol/L) 溶液浸提,使用电感耦合等离子体光谱仪测定(LY/T1232—2015)。土壤生态化学计量比碳氮比(C:N)是有机碳与全氮的比率,碳磷比(C:P)是有机碳与全磷的比率,氮磷比(N:P)是全氮与全磷的比率。

1.2.4 土壤酶活性测定

通过分光光度法测定土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶(βG),纤维二糖水解酶活性(CBH), β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶(NAG),L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(ACP)活性^[18]。具体操作步骤,参照试剂盒说明书(上海酶联生物科技有限公司,上海,中国)。

1.3 数据分析

用 Microsoft Excel 2019 记录数据;使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同林分土壤化学性质及其化学计量比与酶活性的差异显著性($P < 0.05$),并采用 Pearson 相关分析酶活性与土壤化学性质及其化学计量比的相关性,利用软件 Canoco 5.0,以土壤酶为响应变量,土壤化学性质及 C、N、P 元素计量比为解释变量进行冗余分析(RDA)。利用 Origin 2019b 制图。

2 结果与分析

2.1 不同林分杉木胸径、株高和材积的变化

如图 1 所示,改造林中杉木胸径和单株材积与杉木纯林相比有显著差异($P < 0.05$),其中杉木-闽楠、杉木-

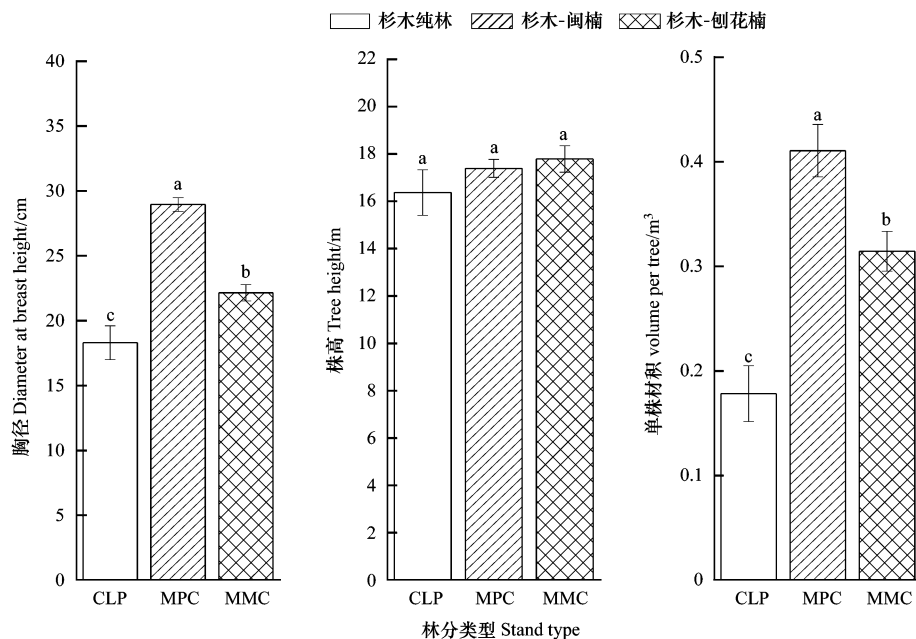


图 1 杉木的胸径、树高和单株材积

Fig.1 The thoracic diameter, height, and volume of Chinese fir

CLP, 杉木人工纯林 *Cunninghamia lanceolata* plantation; MPC, 杉木-闽楠改造林 Mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei*; MMC, 杉木-刨花楠改造林 Mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Machilus pauhoi*. 不同小写字母代表不同林分间存在显著性差异, $P < 0.05$

刨花楠中杉木单株材积较杉木纯林分别提高 130.9%、76.4%;而树高在不同林分之间无显著差异,表明近自然改造显著提高了杉木的胸径和材积。

2.2 不同林分土壤化学性质变化

如表 2 所示,0—20 cm 土层,改造林土壤 pH、SOM、AP 含量与杉木纯林有显著差异($P<0.05$),其中杉木-闽楠与杉木-刨花楠土壤 SOM 含量较杉木纯林分别提高 22.52%、21.04%,AP 含量分别提高 5.91%、9.51%,但改造林土壤 TK 含量则显著低于杉木纯林($P<0.05$)。此外,土壤 TN 含量,杉木-刨花楠与杉木纯林、杉木-闽楠相比分别提高 12.62%、19.59%;AK 含量在杉木-刨花楠与杉木纯林显著高于杉木-闽楠($P<0.05$)。20—40 cm 土层,改造林与杉木纯林在土壤 AP、AK 含量上无显著差异($P<0.05$);TP、TK 含量在三种林分中有显著差异,且杉木-刨花楠>杉木纯林>杉木-闽楠($P<0.05$);SOM 含量,杉木-闽楠与杉木-刨花楠相比杉木纯林分别显著提高 34.84%、71.85%($P<0.05$);pH、TN 含量,杉木纯林显著高于杉木-刨花楠。40—60 cm 土层,pH、TP、AP 含量在三种林分中无显著差异($P<0.05$);改造林土壤 SOM、TN 含量显著高于杉木纯林($P<0.05$);TK 含量,杉木纯林显著高于杉木-闽楠($P<0.05$),而 AK 含量在三种林分无显著差异($P<0.05$)。同一林地不同土层相比,除土壤全量元素,三种林分土壤养分含量变化随着土壤深度的增加而降低;杉木纯林土壤 AP、AK 含量,杉木-闽楠土壤 pH、SOM、AP、AK,以及杉木-刨花楠土壤 AP 含量均表现出上层土壤显著高于下层土壤的趋势($P<0.05$)。

表 2 土壤化学性质对比

Table 2 Comparison of Soil Chemical Properties

林分 Stand	土层深度 Soil depth/cm	酸碱度 pH	有机质 Soil organic matter SOM/(g/kg)	全氮 Total nitrogen TN/(g/kg)	全磷 Total phosphorus TP/(g/kg)	全钾 Total potassium TK/(g/kg)	有效磷 Available phosphorus AP/(mg/kg)	速效钾 Available potassium AK/(mg/kg)
杉木	0—20	4.10±0.017Ab	26.33±0.66Ab	1.03±0.03Bb	0.2872±0.007Aa	14.27±0.46ABa	12.02±0.84Ab	41.31±1.08Aa
CLP	20—40	4.09±0.014Aa	10.16±0.61Bc	1.13±0.02Aa	0.2523±0.002Bb	11.87±0.4Bb	5.55±0.18Ba	24.61±1.29Ba
	40—60	4.05±0.032Aa	9.37±0.84Bb	0.91±0.012Cb	0.2588±0.012Ba	15.96±1.278Aa	3.06±0.01Ca	17.13±0.601Cab
杉木-闽楠	0—20	4.21±0.00Aa	32.26±0.65Aa	0.97±0.02Ab	0.2671±0.006Aa	8.59±0.37Bc	12.73±0.66Aa	32.00±0.86Ab
MPC	20—40	4.12±0.01Ba	17.46±0.45Ba	1.02±0.05Ab	0.2226±0.005Bc	7.51±0.8Bc	6.09±0.45Ba	25.75±2.15Ba
	40—60	4.04±0.01Ca	14.23±1.28Ca	0.92±0.007Aab	0.2631±0.012Aa	11.58±1.22Ab	3.01±0.136Ca	15.00±0.98Cb
杉木-刨花楠	0—20	4.24±0.021Aa	31.87±1.81Aa	0.2607±0.0162Aa	0.2607±0.0162Aa	12.52±0.56Ab	13.17±0.60Aa	41.95±2.48Aa
MMC	20—40	4.08±0.02Bb	13.7±0.44Bb	0.2636±0.0143Aa	0.2636±0.0143Aa	13.88±0.69Aa	5.48±0.59Ba	20.35±2.15Ba
	40—60	4.07±0.018Ba	10.00±0.76Bb	0.2351±0.012Ba	0.2351±0.012Ba	13.22±0.99Aab	3.46±0.33Ca	19.33±1.71Ba

不同小写字母代表不同林分间存在显著性差异;不同大写字母代表同一林分不同土层存在显著性差异, $P<0.05$

2.3 不同林分土壤有机碳、全氮、全磷的生态化学计量特征

由图 2 可知,杉木-闽楠土壤在 3 个土壤层次 C:N 均显著高于杉木纯林、杉木-刨花楠($P<0.05$),杉木-刨花楠仅在 20—40 cm 土层中显著高于杉木纯林($P<0.05$)。土壤 C:P,在各个土层,均为杉木-闽楠>杉木-刨花楠>杉木纯林,且杉木-闽楠与杉木纯林均有显著性差异($P<0.05$)。杉木-刨花楠土壤 N:P 在 0—20 cm 土层显著高于杉木纯林($P<0.05$),20—40 cm 土层,杉木-刨花楠 N:P 却显著低于杉木-闽楠、杉木纯林($P<0.05$),杉木-纯林与杉木-闽楠相比,以及三种林分在 40—60 cm 土层 N:P 均无显著差异($P<0.05$)。三种林分土壤 C:N、C:P 和 N:P 随土层深度的变化没有一致的规律,这可能是土壤腐殖质层对植物养分供应与林木生长吸收利用不同造成的。土壤 C:N、C:P,在三种林分 0—20 cm 土层均显著高于 20—60 cm($P<0.05$)土层,波动幅度较大,其随着土层深度的加深,波动幅度减小;土壤 N:P,杉木纯林、杉木-闽楠在土层 20—40 cm 处比值最大,而杉木-刨花楠在 20—40 cm 处比值最小,其余均无显著差异($P<0.05$)。

2.4 不同林分土壤酶活性变化

由图 3 可知,林地类型与土壤层次对四种土壤酶 CBH、NAG、LAP 与 ACP 酶活性有不同程度的影响。

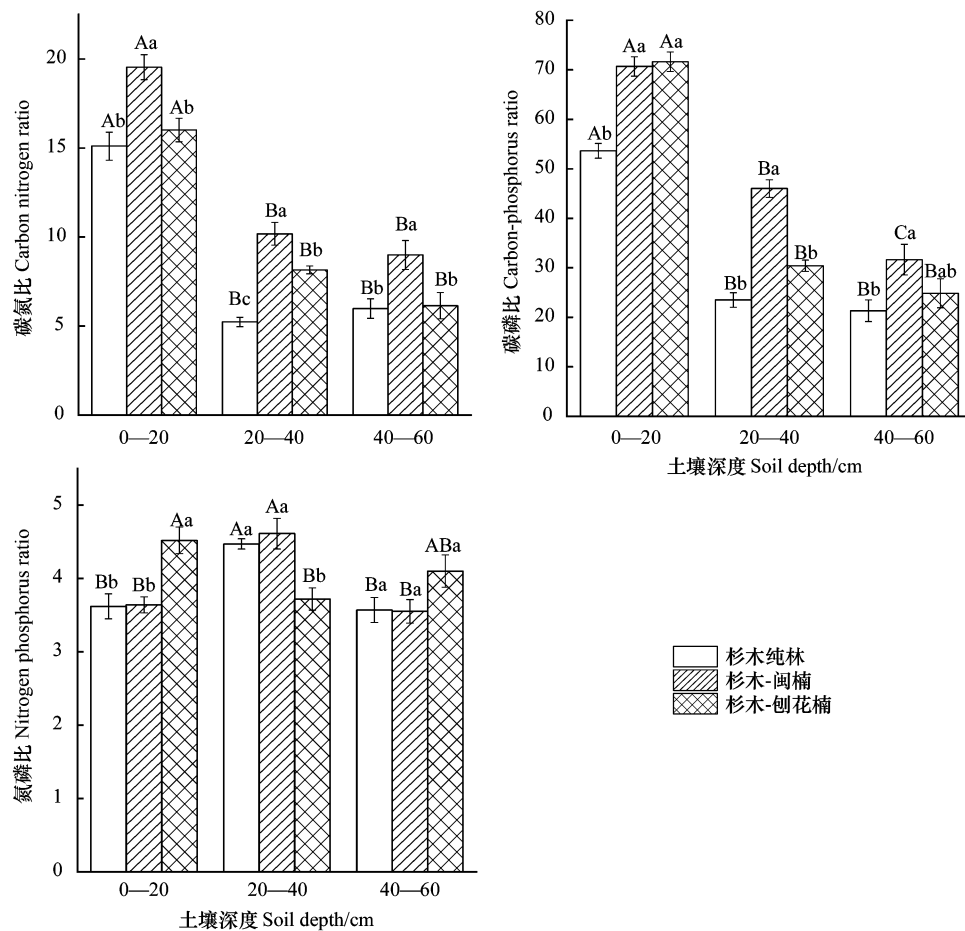


图2 三种林分土壤 C:N、C:P、N:P 特征

Fig.2 Soil C:N, C:P, N:P characteristics of three kinds of stand

不同小写字母代表不同处理间存在显著性差异;不同大写字母代表同一处理不同土层存在显著性差异, $P < 0.05$

C 循环相关酶活性, β G 酶活性在三种林分中的 0—20 cm、20—40 cm 土层无显著差异, 在 40—60 cm 土层存在显著差异 ($P < 0.05$), 杉木纯林 > 杉木-刨花楠 > 杉木-闽楠。CBH 酶活性, 0—20 cm 土层, 改造林之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 杉木-刨花楠 > 杉木纯林 > 杉木-闽楠, 20—40 cm 土层, 杉木-刨花楠与杉木纯林无显著差异, 且均显著高于杉木-闽楠 ($P < 0.05$)。N 循环相关酶活性中, NAG 酶活性, 在 0—20 cm 土层, 杉木-刨花楠显著高于杉木-闽楠、杉木纯林 ($P < 0.05$), 三种林分在 40—60 cm 土层存在显著差异 ($P < 0.05$), 杉木-闽楠 > 杉木纯林 > 杉木-刨花楠。LAP 酶活性, 在 0—20 cm 土层, 杉木-闽楠显著低于杉木纯林、杉木-刨花楠 ($P < 0.05$); 20—40 cm 土层, 改造林之间无显著差异, 且均显著低于杉木纯林 ($P < 0.05$); 在 40—60 cm, 其三种林分存在显著差异 ($P < 0.05$), 杉木-闽楠 > 杉木纯林 > 杉木-刨花楠。磷循环酶 ACP 活性, 0—20 cm、40—60 cm 土层, 三种林分存在显著差异 ($P < 0.05$), 分别为杉木纯林 > 杉木-刨花楠 > 杉木-闽楠、杉木-闽楠 > 杉木纯林 > 杉木-刨花楠; 20—40 cm 土层, 改造林均显著低于杉木纯林 ($P < 0.05$)。C 循环 β G 与 CBH 酶, 三种林分均在 40—60 cm 土层酶活性最强; NAG 酶活性, 杉木-纯林与杉木-闽楠在 0—20 cm、20—40 cm 显著低于 40—60 cm; 杉木-刨花楠中 0—20 cm、40—60 cm 显著大于 20—40 cm 土层; LAP 酶, 杉木纯林与杉木-刨花楠在三个土层无显著差异 ($P < 0.05$), 而杉木-闽楠在三个土层存在显著差异 ($P < 0.05$), 且表现为随着土层的加深, 酶活性越强。ACP 酶活性三种林分在三个土层无明显规律, 杉木纯林在三个土层存在显著差异, 20—40 cm > 0—20 cm > 40—60 cm; 杉木-闽楠土壤 20—40 cm 显著高于 0—20 cm; 杉木-刨花楠在三个土层无显著差异 ($P < 0.05$)。

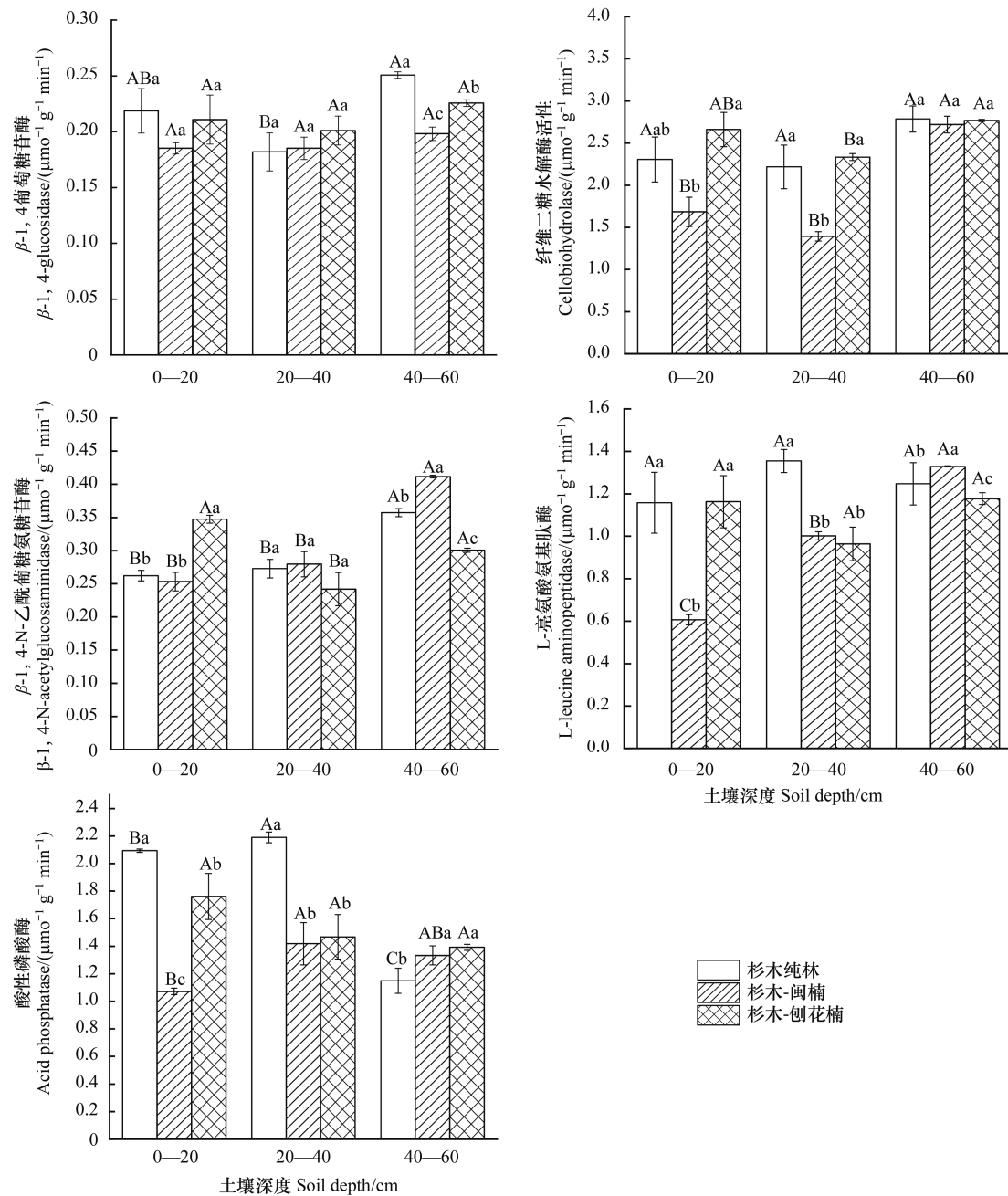


图3 土壤酶活性的变化

Fig.3 Changes of soil enzyme activity

不同小写字母代表不同林分间存在显著性差异;不同大写字母代表同一林分不同土层存在显著性差异, $P < 0.05$

2.5 不同林分土壤养分与土壤酶活性相关分析

由表3可知, Pearson相关性分析分析表明 β G 酶与 TP 显著相关 ($P < 0.05$); CBH 酶与 pH、TP、TK 和 C:P 显著相关 ($P < 0.05$); NAG 酶与 pH、TP 和 TK 显著相关 ($P < 0.05$); LAP 酶与 pH、SOM、TP、TK、APs、C:N 和 C:P 显著相关 ($P < 0.05$); ACP 酶与 TN、TP、TK 和 N:P 显著相关 ($P < 0.05$)。RDA 分析表明(见图4), 第一轴解释了酶活性与土壤养分及化学计量比 65.57% 的变异, 第二轴解释了 18.45% 的变异, 并进一步表明 pH 及有效养分与土壤水解酶活性显著相关。

表 3 土壤化学性质与酶活性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil chemical properties and enzyme activities

COR	β -1,4-葡萄糖苷酶 β -1,4-Glucosidase (β G)	纤维二糖水解酶 Cellobiohydrolase (CBH)	β -1,4-N-乙 酰氨基葡萄糖酶 β -1,4-N- acetylglucosamine enzyme(NAG)	亮氨酸氨基肽酶 Leucine aminopeptidase (LAP)	酸性磷酸酶 Acid phosphatase (ACP)
酸碱度 pH	0.040	-0.643 **	-0.286 *	-0.369 **	-0.061
有机质 Soil organic matter(SOM)	-0.115	-0.208	-0.159	-0.410 **	-0.064
全氮 Total nitrogen(TN)	-0.149	-0.128	-0.17	-0.229	0.322 **
全磷 Total phosphorus(TP)	-0.321 **	-0.373 **	-0.537 **	-0.306 **	0.323 **
全钾 Total potassium(TK)	0.184	0.384 **	0.256 *	0.297 *	0.237 *
有效磷 Available Phosphorus(AP)	-0.103	-0.185	-0.231	-0.269 *	0.166
速效钾 Available potassium(AK)	-0.054	-0.055	-0.201	-0.221	0.227
碳氮比 Carbon nitrogen ratio(C:N)	-0.097	-0.219	-0.177	-0.378 **	-0.118
碳磷比 Carbon phosphorus ratio(C:P)	-0.036	-0.257 *	-0.149	-0.368 **	-0.041
氮磷比 Nitrogen phosphorus ratio(N:P)	-0.011	-0.219	-0.048	-0.028	0.265 *

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; C:N、C:P、N:P 是生态化学计量比

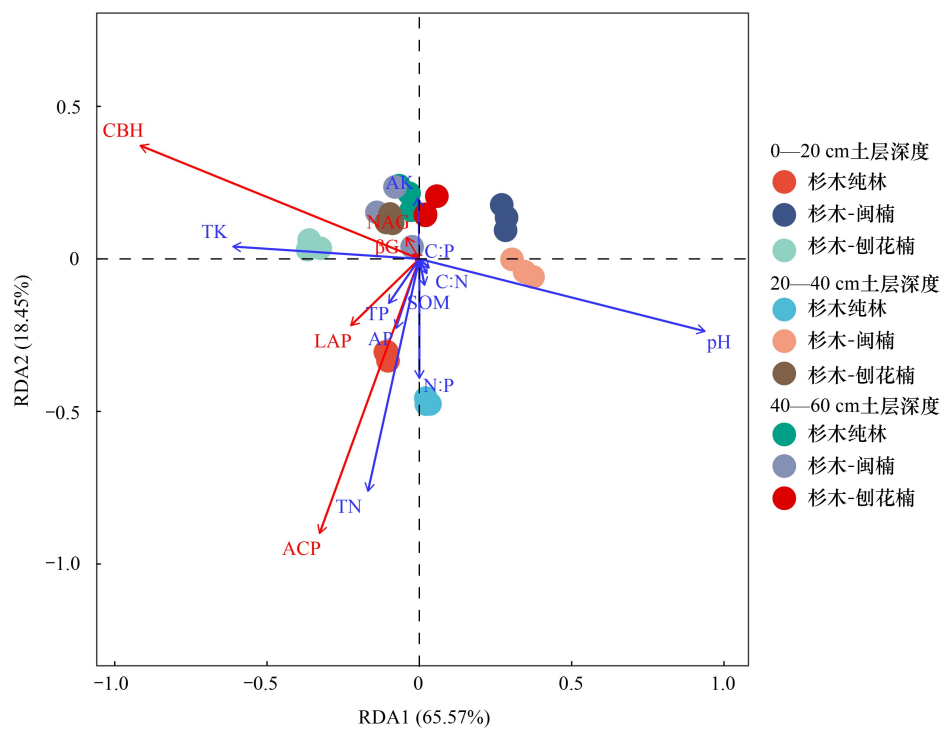


图 4 土壤酶活性与土壤化学性质的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of soil enzyme activity and soil chemical propertie

β G, β -1,4-葡萄糖苷酶; CBH, 纤维二糖水解酶; NAG, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖酶; LAP, 亮氨酸氨基肽酶; ACP, 酸性磷酸酶; SOM, 有机质; TN, 全氮; TP, 全磷; TK, 全钾; AP, 有效磷; AK, 速效钾; C:N, 碳氮比; C:P, 碳磷比; N:P, 氮磷比

3 讨论

3.1 近自然改造对土壤化学性质及生态化学计量比的影响

本研究发现,与杉木纯林相比,近自然改造中杉木的胸径、材积显著增大,显著改善了土壤养分状况,增加了林分地上部分的生物量。这与 Feng 等研究结果一致,其构建了 243 树种的全球混交林实验库,发现混交林

树高、胸径和生物量均显著高于纯林,平均增加量分别为 5.5%、6.8% 和 25.5%^[19]。张勇强在杉木纯林与近自然林的养分含量对比研究中发现,近自然林土壤有机质、全氮、全磷含量显著高于杉木纯林^[20]。杉木作为针叶林,其凋落物中含有较大比例难分解、疏水性强的芳香族化合物,而阔叶树凋落物含有较大比例易变性、亲水性小分子化合物,为微生物提供了充足的养分^[21],土壤微生物的增多进一步影响土壤养分转化效率。在近自然改造后,由于引入阔叶树种,凋落物数量增多,且混合种植可能具有凋落物分解优势,进而改善土壤肥力^[22-23]。改造林土壤有机质含量均显著高于杉木纯林,且表层土壤易受环境因素和凋落物养分归还的影响^[24],进一步说明杉木与阔叶树混交提高了林分生产力。在 0—20 cm 土层,改造林 pH、有效磷含量均显著高于杉木纯林,同时土壤 pH 的提高也能促进全量养分向有效养分转化。不同树种对土壤全量元素的影响不同,例如土壤全磷含量在 0.22—0.29 g/kg 之间,在改造林与杉木纯林之间变化不显著,这可能是由于土壤中的磷含量取决于凋落物的分解和土壤母质风化,而土壤母质风化是一个相对缓慢而漫长的过程^[25],也可能是本研究选择的 30 年生杉木是近熟林,对养分需求相对较少;而补种的幼龄楠木显然需要更多的养分。另外,研究区域土壤为典型的酸性红壤,土壤中铁、铝活性较强,超过 75% 磷与铁、铝和镁等金属离子结合形成难溶性磷酸盐^[18]。因而,在植物缺乏有效元素的限制下,植物与微生物的互作,会倾向于将全量元素向有效养分的转化。因此全量在一定程度上并不完全代表土壤养分的实际状况,土壤有效养分是根系吸收的直接来源。不同林分各土层有机质、有效磷与速效钾含量随土壤深度的加深而降低,这与前人研究一致^[26-27]。不同林分 pH 表现为表层土壤高于深层土壤,这与大多数人研究结果不同,且不同林分显著差异不同,这可能与杉木、闽楠及刨花楠的植物残体有不同的分解速率和产物,其凋落物分解过程产生的有机酸等物质,这些物质可以中和土壤中的酸性物质,从而使表层土壤 pH 相对较高,以及大量凋落物与植物根系集中分布在表层,对土壤产生影响^[28]。

土壤 C、N 和 P 的比值是土壤质量的重要指标,C:N 在一定范围内与土壤有机质的分解速率呈反比,C:P 反映了土壤微生物对土壤有效磷的代谢趋势,N:P 是土壤 N、P 养分限制的指标^[29-30]。本研究中改造林 C:N、C:P 均高于杉木纯林,低 C:N、C:P 意味着有机质分解较快,对于有较大降雨量和降雨频率的南方杉木人工林来讲可能不利于土壤肥力的维持^[31],且土壤 C:P 能有效衡量土壤磷元素的有效性,土壤 C:P 越低表明磷元素有效性越高。在本研究中 0—20 cm 土层,改造林土壤 C:P 均显著高于杉木纯林,表明改造林分磷有效性更低,这显然和土壤有效磷含量结果不一致。此结果更能说明土壤全量并不能完全代表养分的实际代谢状况。此外,在不同林分中 C:N 和 C:P 均随着土壤深度的增加而降低,这与大多数研究一致^[32]。杉木-刨花楠改造林 N:P 在 0—20 cm 土层显著高于杉木纯林,且均低于我国亚热带区域土壤 N:P 的平均值 4.92^[33],说明杉木-刨花楠改造林土壤磷的有效性较杉木纯林得到提高,但总体而言相对较低。综上所述,近自然改造有助于提高杉木林分生物量和土壤质量,这对杉木人工林可持续经营和增加森林碳汇具有积极意义。

3.2 近自然改造对土壤酶活性的影响

土壤酶在有机质分解和确定土壤养分有效性等方面具有决定性作用,其活性直接影响养分循环效率^[34-35]。在本研究中,三种不同林分显著影响了土壤酶活性。在 0—20 cm 土层碳循环相关酶中,改造林土壤 β G 与 CBH 酶活性与杉木纯林相比均无显著性差异,而土壤有机质含量却显著增加,说明当碳不是主要限制元素, β G 酶活性受其他性质的影响更大,这与孙思怡在林下套种阔叶树对土壤酶活性影响的研究中一致^[36]。NAG 酶活性,杉木-刨花楠改造林与杉木纯林有显著差异,而杉木-闽楠改造林与杉木纯林无显著差异,这可能与引入树种的不同对酶活性影响不同,同时有待进一步验证 NAG 酶活性的影响因素。LAP 酶活性,杉木-闽楠改造林显著低于杉木纯林,这可能与有机质和 C:N 显著提高有关。刘仁等研究发现有机质与土壤氮素循环关系密切,认为土壤矿化速率与有机质呈正相关关系,当有机质与氮有效元素增多,微生物会减少分泌相关的氮水解酶^[37]。只有当土壤中磷供应不足时,ACP 酶活性才会升高,而杉木-闽楠改造林与杉木-刨花楠改造林的 ACP 酶活性显著低于 CLP,说明改造林与杉木纯林相比,土壤磷素得到缓解^[38]。而南方土壤中磷通常以难溶性磷酸盐存在,需要土壤微生物会分泌更多的磷水解酶来矿化有机磷。说明近自然改造后凋

落物的数量和质量均增加,土壤养分有效性提高进而改变了土壤微生物生物活性,缓解磷限制^[39]。因此当有效磷含量提高时,会减少相关酶的分泌。20—40 cm 土层土壤酶活性,总体来看,改造林差异较小,杉木纯林与改造林之间差异较大,杉木-闽楠改造林与杉木-刨花楠改造林仅在 CBH 酶活性存在差异;40—60 cm 土层土壤酶活性,除 CBH 酶活性,其余酶活在杉木纯林、杉木-闽楠与杉木-刨花楠改造林之间均存在差异,表明阔叶树种的引入会显著改变土壤酶活性。

3.3 土壤化学性质与土壤酶的相关性分析

土壤养分影响土壤微生物的生长而间接作用于土壤水解酶,使土壤酶活性与土壤养分存在大小不一的相关性^[40—41]。在冗余分析中发现,土壤酶活性主要与土壤 pH 和有效元素显著相关,而与全量无显著关系。ACP 酶活性与有效磷呈显著正相关,而 C 循环酶、N 循环酶与土壤碳氮养分无显著相关,这再一次证明本研究样地土壤主要受磷元素的养分限制,这与韦宜慧等研究一致,杉木的第一限制因素是磷^[42]。此外, Pearson 相关性分析中,土壤全磷含量与酶活性均显著相关,这与冗余分析中的结果一致,说明试验地土壤与磷养分的限制有关;pH 与 CBH、NAG、LAP 酶活性具有显著的相关性,这与大多数人研究一致^[16, 43],这是因为土壤酶活性会受到土壤环境的影响。有效养分与酶活性无显著相关性,这可能受到土壤 pH、团聚体结构、水分含量等多种非生物因素的影响^[44]。

4 结论

近自然改造显著提高杉木的胸径和单株材积,提高林分生物量和土壤质量,表明近自然改造能促进杉木的高质量生长,提升大径材的出材率。引入阔叶树种,土壤有机质和有效养分(有效磷、速效钾)含量升高,改善土壤养分状况和增加森林生产力;不同树种对全量的影响不同。土壤生态化学计量表明本研究区域有效磷含量较低。对不同林分土壤水解酶活性的分析,发现杉木纯林转变为杉木-闽楠、杉木-刨花楠复层混交林显著影响土壤水解酶活性,进而优化土壤养分配置。总体上,近自然改造提高了杉木人工林土壤肥力,促进养分循环,有利于杉木人工林生产力长期维持和可持续经营。

参考文献(References):

- [1] Liu G S, Xu D M, Wang L M, Li K B, Liu W P. Effect of organic/inorganic compounds on the enzymes in soil under acid rain stress. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(2): 177-80.
- [2] 栾历历, 刘恩媛, 顾新, 孙建新. 凋落物处理和氮添加对松栎混交林土壤生态酶化学计量的影响. *生态学报*, 2020, 40(24): 9220-9233.
- [3] Farooq T H, Kumar U, Mo J, Shakoor A, Wang J, Rashid M, Tufail M A, Chen X Y, Yan W D. Intercropping of peanut-tea enhances soil enzymatic activity and soil nutrient status at different soil profiles in subtropical southern China. *Plants*, 2021, 10(5): 881.
- [4] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系. *环境科学*, 2018, 39(3): 1404-1412.
- [5] Hu N, Li H, Tang Z, Li Z F, Li G C, Jiang Y, Hu X M, Lou Y L. Community size, activity and C:N stoichiometry of soil microorganisms following reforestation in a Karst region. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 73: 77-83.
- [6] Stark S, Männistö M K, Eskelinen A. Nutrient availability and pH jointly constrain microbial extracellular enzyme activities in nutrient-poor tundra soils. *Plant and Soil*, 2014, 383(1): 373-385.
- [7] 孙沉沉, 王自强, 潘畅, 宋雅琦, 俞元春. 杉木木荷混交对土壤养分和酶活性的影响. *江西农业大学学报*, 2023, 45(3): 517-525.
- [8] Li R S, Han J M, Guan X, Chi Y G, Zhang W D, Chen L C, Wang Q K, Xu M, Yang Q P, Wang S L. Crown pruning and understory removal did not change the tree growth rate in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *Forest Ecology and Management*, 2020, 464: 118056.
- [9] 谭许脉, 张文, 肖纳, 莫雪青, 高冠女, 尤业明, 明安刚, 黄雪蔓. 杉木林改造成乡土阔叶林对林下植物物种组成和多样性的影响. *生态学报*, 2022, 42(7): 2931-2942.
- [10] 王淑真, 梁晶晶, 包明琢, 潘菲, 周垂帆. 不同林龄杉木林土壤磷形态与解磷菌变化. *林业科学*, 2022, 58(2): 58-69.
- [11] Forrester D I, Pares A, O'Hara C, Khanna P K, Bauhus J. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of *Eucalyptus* and nitrogen-fixing *Acacia*. *Ecosystems*, 2013, 16(1): 123-132.
- [12] 盛伟彤. 关于我国人工林长期生产力的保持. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 1-14.
- [13] Shu W W, Ming A G, Zhang J H, Li H, Min H L, Ma J X, Yang K, Li Z Y, Zeng J, Wei J L, Li Z L, Tao Y. Effects of close-to-nature transformation on soil enzyme activities and organic carbon fractions in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations. *Forests*, 2022, 13(6): 872.

- [14] 潘云龙, 林国伟, 陈志为, 樊月, 陈欣凡, 吴承祯, 洪滔. 杉木纯林及杉桐混交林土壤酶活性研究. 热带作物学报, 2018, 39(5): 846-851.
- [15] 黄钰辉, 张卫强, 甘先华, 唐洪辉, 盘李军, 洗伟光. 南亚热带杉木林改造不同树种配置模式的土壤质量评价. 中国水土保持科学, 2017, 15(3): 123-130.
- [16] Wang C Q, Xue L, Dong Y H, Hou L Y, Wei Y H, Chen J Q, Jiao R Z. Contrasting effects of Chinese fir plantations of different stand ages on soil enzyme activities and microbial communities. Forests, 2019, 10(1): 11.
- [17] 李朝栋, 陈友凤, 王春相. 江西省杉木人工林二元立木材积表适应性研究. 江西林业科技, 1994, 22(2): 23-25.
- [18] 王超群. 基于林龄和密度效应的杉木人工林土壤性质研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [19] Feng Y H, Schmid B, Loreau M, Forrester D I, Fei S L, Zhu J X, Tang Z Y, Zhu J L, Hong P B, Ji C J, Shi Y, Su H J, Xiong X Y, Xiao J, Wang S P, Fang J Y. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions. Science, 2022, 376(6595): 865-868.
- [20] 张勇强. 杉木林下植物功能群构建及其对土壤性质的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [21] 郑文辉. 凋落物多样性对杉木苗期生长及土壤生态功能的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [22] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林廷武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米楮次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2016, 40(5): 447-457.
- [23] Li Y B, Li Q, Yang J J, Lü X, Liang W, Han X G, Bezemer T M. Home - field advantages of litter decomposition increase with increasing N deposition rates: a litter and soil perspective. Functional Ecology, 2017, 31(9): 1792-1801.
- [24] 张亚冰, 吕文强, 易武英, 周传艳, 吴永贵, 周少奇. 贵州月亮山 5 种森林类型土壤生态化学计量特征研究. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(6): 617-625.
- [25] 邱勇斌, 凌高潮, 郑文华, 邢文黎, 成向荣. 间伐对杉木人工林不同组分碳、氮、磷含量及其生态化学计量关系的影响. 林业科学研究, 2019, 32(4): 64-69.
- [26] 苟丽晖, 孙兆地, 聂立水, 罗盼盼, 吴记贵, 许武德. 北京松山自然保护区不同母质油松林土壤氮、磷、钾含量垂直分布. 应用生态学报, 2013, 24(4): 961-966.
- [27] Zhou L, Sun Y J, Saeed S, Zhang B, Luo M. The difference of soil properties between pure and mixed Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations depends on tree species. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e01009.
- [28] 梁燕芳, 罗华龙, 蒋林, 杨梅. 不同间伐强度对杂交松人工林土壤理化性质及酶活性的影响. 北华大学学报: 自然科学版, 2022, 23(4): 521-529.
- [29] 张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗垠, 马祥庆. 不同林龄杉木人工林土壤 C:N:P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2019, 39(7): 2520-2531.
- [30] 刘涛, 王家妍, 李万年, 莫雅芳, 杨梅. 杉木×观光木异龄复层混交对林木生长及土壤理化性质的影响. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 125-130.
- [31] 曹娟, 闫文德, 项文化, 湛小勇, 雷丕锋. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8.
- [32] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408.
- [33] Bai Y F, Chen S Y, Shi S R, Qi M J, Liu X H, Wang H, Wang Y X, Jiang C Q. Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation. Science of the Total Environment, 2020, 723: 137868.
- [34] Piotrowska-Długosz A, Kobierski M, Długosz J. Enzymatic activity and physicochemical properties of soil profiles of luvisols. Materials, 2021, 14(21): 6364.
- [35] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, Sinsabaugh R L, Stromberger M E, Wallenstein M D, Weintraub M N, Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 216-234.
- [36] 孙思怡, 卢胜旭, 陆宇明, 许恩兰, 吴东梅, 刘春华, 蒋宗垠, 郭剑芬. 杉木林下套种阔叶树对土壤生态酶活性及其化学计量比的影响. 林业科学研究, 2021, 34(1): 106-113.
- [37] 刘仁, 袁小兰, 刘俏, 张春阳, 郭春兰, 陈伏生, 王辉民, 李建军. 林下植被去除对杉木人工林土壤酶活性及其化学计量比的影响. 林业科学研究, 2020, 33(5): 121-128.
- [38] 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽. 红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应. 环境科学, 2020, 41(4): 1960-1967.
- [39] Chen X D, Condron L M, Dunfield K E, Wakelin S A, Chen L J. Impact of grassland afforestation with contrasting tree species on soil phosphorus fractions and alkaline phosphatase gene communities. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 159: 108274.
- [40] 刘西军, 蔡天培, 杜杰, 袁莉芹, 陈杰, 徐小牛. 氮添加和采脂对湿地松林土壤酶活性及酶化学计量比的影响. 生态学杂志, 2022, 41(2): 227-235.
- [41] 宋思宇, 陈亚梅, 汪涛, 廖咏梅, 张胜, 胥晓. 不同林龄的西藏林芝云杉人工林土壤酶活性及化学计量比特征. 应用与环境生物学报, 2023, 29(1): 178-185.
- [42] 韦宜慧, 陈嘉琪, 董玉红, 厚凌宇, 焦如珍. 杉木人工林土壤溶磷细菌筛选及培养条件优化. 林业科学研究, 2020, 33(4): 83-91.
- [43] Wei C C, Xiaofei L, Lin C F, Li X F, Li Y, Zheng Y X. Response of soil enzyme activities to litter input changes in two secondary *Castanopsis carlessii* forests in subtropical China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42: 692-702.
- [44] 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼. 黄土旱塬 24a 不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征. 环境科学, 2023, 44(5): 2746-2755.